

На правах рукописи

Чжан Анатолий Владимирович

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО  
ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ И  
ПЛЕНКАХ

Специальность 01.04.11 — физика магнитных явлений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Екатеринбург 2013

Работа выполнена в Научно-образовательном центре перспективных и наноразмерных материалов и нанотехнологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный консультант доктор физико-математических наук  
профессор Патрин Геннадий Семенович

Официальные  
оппоненты Овчинников Сергей Геннадьевич, доктор  
физико-математических наук, профессор  
ФГБУН Институт физики им. Л.В.  
Киренского СО РАН, заместитель  
директора

Сухоруков Юрий Петрович, доктор  
физико-математических наук,  
профессор, ФГБУН Институт физики  
металлов УрО РАН, заведующий  
лабораторией магнитных  
полупроводников

Аплеснин Сергей Степанович, доктор  
физико-математических наук,  
профессор, ФГБОУ «Сибирский  
государственный аэрокосмический  
университет имени академика М.Ф.  
Решетнева», заведующий кафедрой  
физики  
Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Башкирский  
государственный университет», г. Уфа

Защита состоится 12 декабря 2013 г. в 13.00  
на заседании диссертационного совета Д 212.285.24  
на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620000, г. Екатеринбург,  
ул. Ленина, 51, зал диссертационных советов, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор

Кудреватых Н.В.

## Общая характеристика работы

### *Актуальность темы*

Исследования процессов перемагничивания ферромагнетиков (ФМ) являются одним из основных направлений в физике магнитных явлений. Их актуальность обусловлена как теоретической, так и практической значимостью. Изучение механизмов перемагничивания позволяет получить сведения о магнитных свойствах материалов и взаимодействии магнитного момента с электронной и кристаллической подсистемами. В силу этого, исследования процессов перемагничивания лежат в основе фундаментального подхода к изучению, а также широкому практическому применению магнитных материалов.

В соответствии с решаемой задачей экспериментальные методы могут быть самыми разнообразными и включать в себя резонансные, импульсные и квазистатические. Каждый из этих методов и, в частности, последний имеет свою область применения и эффективного использования.

Квазистатическое перемагничивание предполагает использование достаточно малых частот изменения внешнего магнитного поля, которые значительно ниже собственных частот колебаний магнитного момента. В этом случае на динамику намагничивания будут оказывать влияние релаксационные явления, которые в той или иной мере проявляются в большинстве ФМ материалов.

Согласно Л. Неелю [1] релаксационные явления в магнетиках могут быть вызваны диффузионными и флуктуационными механизмами. Первый механизм связан с перераспределением точечных дефектов, которое вызывает появление спонтанного магнитного момента. Исследование динамики перемагничивания позволяет установить энергетические параметры диффузионных процессов, что дает возможность моделирования состояния дефектов в кристаллической решетке.

Чувствительность таких исследований может быть значительно повышена в случае, если перемагничивание осуществляется движением доменных границ (ДГ). Доменная граница, в силу своей уникальности, может служить чувствительным индикатором, способным реагировать на небольшие изменения в структуре вещества, вызванные релаксационными процессами [2].

Второй механизм обусловлен тепловыми колебаниями спинов и наблюдается в магнитных частицах размером в несколько нанометров или в тонких магнитных пленках. Изучение динамики перемагничивания при наличии релаксации позволяет определить структурные особенности материалов, например, для случая тонких магнитных пленок, что дает возможность использовать такого рода исследования для получения новых магнитных материалов с заданными свойствами.

Одним из важных достоинств таких исследований является применение низких частот при квазистатическом перемагничивании, что позволяет

исследовать как диэлектрические, полупроводниковые, так и металлические пленочные материалы. Наряду с общими закономерностями релаксационные явления в них имеют свои характерные особенности.

Диссертация посвящена исследованию ФМ диэлектриков, ФМ полупроводников и ФМ металлов, которые проявляют необычные свойства и имеют перспективу практического использования. В магнитных полупроводниках доменная структура (ДС) и процессы намагничивания на момент проведения работы автором диссертации недостаточно исследованы, а имеющиеся отдельные публикации носят несистематизированный характер. Типичным представителем магнитных полупроводников является селенохромит кадмия  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ . Создание поликристаллических пленок этого соединения позволило значительно углубить понимание его физических свойств. Исследование процессов перемагничивания и ДС позволяет определить влияние катион-анионных вакансий на магнитные свойства пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ .

Другим соединением, которое исследуется в работе, является борат железа  $\text{FeBO}_3$ . Кристаллы бората железа прозрачны в видимом диапазоне электромагнитного излучения. Это соединение относится к слабым ферромагнетикам, обладает достаточно высокой температурой Кюри (348 К) и намагниченностью насыщения, при этом является диэлектриком. Отличительная особенность соединения  $\text{FeBO}_3$  – это наличие в нем фотоиндуцированных эффектов, которые проявляются в увеличении магнитной восприимчивости, а также возникновении автоколебаний магнитного момента под действием достаточно слабого светового облучения. Исследования, представленные в настоящей работе, во многом проясняют механизмы возникновения таких эффектов.

В настоящее время широко исследуются механизмы и кинетика формирования объектов наноразмерного масштаба. Экспериментальные исследования таких материалов имеют определяющее значение для выявления и понимания общих закономерностей, которым подчиняются нанокристаллические и аморфные ферромагнетики.

В диссертации изучаются пленки сплава  $\text{Co-P}$ , которые получены методом химического осаждения. Увеличение концентрации фосфора приводит к радикальному изменению структуры пленок от поликристаллической до аморфной. Такое свойство сплавов  $\text{Co-P}$  было использовано для получения многослойных пленок, в которых высококоэрцитивный (ВК) и низкокоэрцитивный (НК) слои выполнены соответственно из поликристаллического и аморфного сплавов  $\text{Co-P}$ .

Тема диссертации соответствует «Перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований», утвержденных президиумом РАН. Выполненная работа была поддержана грантами Российского Фонда Фундаментальных исследований № 08-02-00397А, № 11-02-00675А и грантом АБЦП «Развитие потенциала Высшей школы 2009 – 2010 г.г.» № 2.1.1/4399.

## ***Цель диссертационной работы***

Установление механизмов квазистатического перемагничивания ФМ кристаллов и пленок при наличии в них релаксационных явлений, вызванных перераспределением структурных дефектов под влиянием намагниченности, фотоактивации, тепловых флуктуаций, и создание новых функциональных магнитных материалов на их основе.

## ***Задачи исследований***

1. Методом вакуумного напыления получить поликристаллические пленки магнитного полупроводника  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , обладающие малыми потерями при перемагничивании. Определить влияние вакансий Se и Cd на величину константы магнитострикции пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ .
2. Провести комплексное исследование процессов перемагничивания плёнок магнитного полупроводника  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  в широком интервале температур и магнитных полей. Провести теоретический расчет энергии наведенной анизотропии  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  с учетом анизотропных ионов  $\text{Cr}^{4+}$ .
3. Провести исследования температурной, частотной и временной зависимости магнитной восприимчивости слабого ферромагнетика  $\text{FeVO}_3$  в области от 77 К до температуры Нееля. Определить физические механизмы, вызывающие релаксацию намагниченности в  $\text{FeVO}_3$  при воздействии и в отсутствие света.
4. Выяснить физические причины формирования полосовых структур в  $\text{FeVO}_3$  и их фотоиндуцированных динамических изменений при воздействии оптического излучения.
5. Определить магнитные и релаксационные свойства химически осажденных поликристаллических пленок в области толщин меньших 10 нм.
6. Определить механизмы, обуславливающие величину коэрцитивной силы в аморфных пленках Co-P в отсутствие и при наличии одноосной наведенной анизотропии.
7. Методом химического осаждения получить качественные трехслойные пленки, состоящие из высококоэрцитивного (ВК) и низкокоэрцитивного (НК) магнитных слоев, разделенных немагнитной прослойкой. Определить физические причины, которые приводят к релаксационному изменению поля смещения петли гистерезиса при перемагничивании низкокоэрцитивного слоя.
8. На основе метода химического осаждения разработать способ получения трехслойных структур Co-P с минимальной коэрцитивной силой.

## ***Научная новизна***

1. Показано, что магнитная релаксация в пленках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , проявляющаяся в стабилизации доменных границ, вызывается ионами  $\text{Cr}^{4+}$ .

На основе одноионного приближения выполнен расчет поля стабилизации  $H_S$  и энергии наведенной анизотропии при различных температурах. Проведено сравнение и определены условия согласия расчетных и экспериментальных данных.

2. Установлено, что при наличии анион-катионной нестехиометрии в пленках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  возникает магнитоупругая анизотропия, связанная с сильным спин-орбитальным взаимодействием ионов  $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Cr}^{2+}$ . Показано, что вакансии Se вносят отрицательный вклад в величину константы магнитострикции  $\lambda_s$ , а вакансии Cd - положительный. В области взаимной компенсации таких дефектов  $\lambda_s$  стремится к нулю.

3. Определены механизмы формирования полосовых структур в  $\text{FeVO}_3$ . Показано, что их можно рассматривать как неоднородные магнитные структуры (НМС), образование которых связывается с выходом ферромагнитного момента из базовой плоскости.

4. Обнаружена аномальная температурная зависимость начальной магнитной восприимчивости  $\text{FeVO}_3$ , которая связывается с наличием НМС.

5. Обнаружены фотоиндуцированные автоколебания НМС в номинально чистых кристаллах  $\text{FeVO}_3$  при  $T < 148$  К. Установлены устойчивое и неустойчивое состояния, в которых может находиться ферромагнитный момент при воздействии света, что приводит к возникновению релаксационных переходов между этими состояниями.

6. Определены условия формирования химически осажденных поликристаллических пленок Co-P в области нанотолщин. Установлено, что при толщинах меньше 10 нм пленки состоят из слабо связанных между собой кристаллитов со случайной ориентацией осей легкого намагничивания.

7. Установлены физические механизмы, которые определяют величину коэрцитивной силы в изотропных и анизотропных аморфных пленках Co-P. Показано, что:

а) в изотропных пленках коэрцитивная сила обусловлена релаксационными процессами, вызывающими стабилизацию доменных границ (ДГ);

б) в пленках с наведенной анизотропией величина коэрцитивной силы в основном определяется структурой ДГ.

8. Методом химического осаждения создана трехслойная структура, состоящая из магнитных слоев поликристаллического и аморфного сплавов Co-P и немагнитной прослойки из аморфного сплава Ni-P. В таких структурах обнаружено:

а) релаксационное уменьшение поля смещения и коэрцитивной силы низкокоэрцитивного слоя (НК) с увеличением циклов перемагничивания. Показано, что наблюдаемый эффект связан с температурными флуктуациями намагниченности в поликристаллическом слое Co-P;

б) улучшение характеристик интерфейса при введении атомов Ni в аморфный сплав Co-P.

9. В трехслойных структурах, состоящих из аморфных слоев Co-P

(Co-Ni-P) с немагнитной прослойкой из Ni-P, обнаружено уменьшение коэрцитивной силы на два порядка по сравнению с однослойными пленками Co-P.

### ***Теоретическая и практическая значимость***

1. Результаты по исследованию ДС и стабилизации ДГ в ферромагнетиках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  и  $\text{FeBO}_3$  могут быть использованы для создания новых магнитных материалов с заданными свойствами с целью их применения в электронной технике.

2. Разработан метод создания пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  с магнитострикцией близкой к нулю и минимальной коэрцитивной силой.

3. Разработан новый метод регистрации ДС, который не только значительно упрощает визуализацию доменных структур в широком спектральном диапазоне, включая инфракрасную и ультрафиолетовую области, а также позволяет применить современные цифровые устройства, например, WEB-камеры, для определения таких магнитных характеристик, как магнитная проницаемость, коэрцитивная сила локальных участков образца.

4. Методом химического осаждения создан новый магнитный материал для датчиков слабых магнитных полей. Он представляет собой трехслойную структуру: аморфный магнетик Co-P – немагнитная прослойка Ni-P – аморфный магнетик Co-P.

5. В сэндвич-структурах, состоящих из магнитных слоев поликристаллического и аморфного сплавов Co-P и немагнитной прослойки из аморфного сплава Ni-P, достигнуто улучшение качества интерфейса путем введения атомов Ni в аморфный сплав Co-P.

### ***Методология и методы исследования***

Методологической основой диссертационного исследования является совокупность экспериментальных методов, используемых для решения поставленных задач. При этом для комплексных исследований физических свойств материалов используются как промышленные, так и изготовленные в лаборатории оригинальные установки.

Исследования процессов перемангничивания, магнитооптического вращения плоскости поляризации световой волны, а также доменной структуры осуществлялись на установках, основанных на магнитооптических эффектах Керра и Фарадея. Измерения петель гистерезиса в плоскости пленок с локальных участков производились на магнитооптической установке НАНОМОКИ.

Определение магнитной восприимчивости, ее температурной и частотной зависимости осуществлялось с применением индукционных методов.

Магнитоупругая анизотропия пленок исследовалась с помощью

ферромагнитного резонанса на частоте 9,2 ГГц.

Величина намагниченности и ее температурная зависимость (от 4,2 до 350 К) определялась на СКВИД-магнитометре.

Химический анализ образцов проводился методом рентгеноструктурного анализа.

Структурные исследования производились с помощью атомно-силового микроскопа и EXSAFS-микроскопии.

Измерение электросопротивления пленок осуществлялось с помощью 4-х зондового метода.

### ***Положения, выносимые на защиту:***

1. Результаты комплексного исследования магнитных свойств поликристаллического магнитного полупроводника  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  в тонкопленочном состоянии, полученного методом вакуумного напыления:

а) динамика намагничивания пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  в переменных и постоянных магнитных полях;

б) магнитоупругой анизотропия пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  при наличии дефектов *n*- и *p*-типа, обусловленных катион-анионной нестехиометрией.

2. Результаты исследований физических механизмов и кинетики автоколебаний НМС в  $\text{FeVO}_3$  под действием света.

3. Результаты исследований температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\text{FeVO}_3$ .

4. Результаты исследований структурных особенностей роста поликристаллических пленок  $\text{Co-P}$  в области нанотолщин, полученных методом химического осаждения.

5. Результаты исследований физических механизмов, обуславливающих коэрцитивную силу аморфных пленок на основе  $\text{Co-P}$  при наличии и в отсутствие наведенной магнитной анизотропии.

6. Результаты исследований магнитных параметров сэндвич-структур, полученных методом химического осаждения.

### ***Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность подтверждается:***

– согласованностью модельных расчетов с экспериментальными данными;

– неоднократной воспроизводимостью наблюдаемых эффектов;

– повторением полученных результатов в более поздних публикациях других авторов.



### ***Вклад соискателя:***

Личный вклад автора диссертации включает в себя формулировку темы научного направления, постановку целей и определение задач, выбор комплекса экспериментальных методик для их решения, конструкторскую разработку магнитооптических и индукционных установок для температурных исследований ДС и процессов перемангничивания, проведение магниторезонансных и электрических измерений, а также систематизацию и обобщение экспериментальных данных.

### ***Апробация работы:***

Результаты, включенные в диссертацию, докладывались на Всесоюзных, Российских и международных конференциях, в том числе: на Всесоюзных конференциях по физике магнитных явлений: Донецк, 1985, Ташкент, 1990; на Московских международных симпозиумах по магнетизму (MISM), 2008, 2011; на международных конференциях по магнитным материалам, Иркутск, 2008, 2012; на международных конференциях «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ): Москва, 2006, Москва, 2009, Астрахань, 2012; на международных конференциях по нанофизике: Екатеринбург, 2010, Нижний Новгород, 2011; на международных симпозиумах «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ОМА ОДПО: Ростов-на-Дону, 2006, 2009, 2010, 2011; на Всесоюзных школах-семинарах по новым магнитным материалам: Бердянск, 1982, Хупсан, 1988; на международном симпозиуме по магнитооптике, Харьков, 1991; на Всесоюзной конференции «Тройные полупроводники и их применения», Кишинев, 1987; на II Всесоюзном семинаре по аморфному магнетизму, Красноярск, 1980; на I Всесоюзном семинаре по сегнетомагнетизму и магнитным полупроводникам, Москва, 1984.

### ***Структура и объем диссертации***

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. В ней содержится 261 страниц машинописного текста, 112 рисунков и 301 источник литературы. Нумерация формул, таблиц и рисунков ведется по главам. В конце каждой главы сделаны выводы. Общие выводы приведены в конце работы.

### ***Краткое содержание работы.***

Во ВВЕДЕНИИ дана общая характеристика работы, сформулирована тема диссертации, обоснованы ее актуальность, научная и практическая значимость.

ГЛАВА 1 МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ. В этой главе

приводится литературный обзор теоретических и экспериментальных исследований релаксационных процессов в ферромагнетиках при квазистатическом перемагничивании.

В реальных веществах всегда имеется дефектность кристаллической решетки, которая может быть вызвана нестехиометрией, наличием примесей или дислокациями. Появление в кристалле магнитного порядка может вызвать энергетическую неэквивалентность в распределении дефектов, следовательно, и их смещение, что, в свою очередь, приведет к появлению дополнительной одноосной магнитной анизотропии, которая в размагниченном образце может стабилизировать ДГ. Стабилизация границ примечательна тем, что хорошо прослеживается экспериментально в виде таких эффектов как пермивар-эффект или перетянутой петли гистерезиса, независимости магнитной проницаемости от величины магнитного поля, дезаккомодации магнитной проницаемости, а также наличия максимума магнитных потерь на частоте, совпадающей с частотой релаксации наведенной анизотропии, стабилизирующей доменную границу. Для проявления каждого из этих эффектов требуются определенные условия эксперимента.

Информативными представляются исследования релаксационных эффектов в аморфных магнетиках. При описании аморфных сплавов обычно предполагается, что они представляют собой пространственно однородные вещества, имеющие изотропное атомное распределение. В аморфных сплавах не существует абсолютно однородной и изотропной структуры, и характеристики атомного распределения в аморфном сплаве, такие как плотность, химический состав, внутренние напряжения будут иметь локальные отличия. Поэтому структура аморфных сплавов является заведомо неравновесной, что ведет к различным релаксационным процессам, вызванным активационными переходами атомов к равновесным позициям.

Далее приводится краткий обзор работ, посвященных исследованию релаксационных явлений в многослойных и, в том числе, спин-вентильных наноструктурах. Временные изменения магнитных свойств в таких системах проявляются в виде релаксационного уменьшения поля смещения петли гистерезиса с увеличением количества циклов перемагничивания, которое впервые наблюдалось в окисленных пленках Co. Физическое объяснение этого эффекта связывается с необратимыми переориентациями магнитного момента антиферромагнитного (АФМ) слоя, которые вызваны термоактивационными процессами.

В заключительной части обзора подчеркивается, что исследование динамических изменений в веществе, которые вызываются релаксационными явлениями при перемагничивании, имеют как научный, так и прикладной интерес. С практической точки зрения наиболее важным представляется то, что такие исследования позволяют получить дополнительную информацию о свойствах веществ, что является актуальным при создании новых магнитных материалов с прогнозируемыми свойствами.

На основе проведенного обзора формулируются задачи работы.

## **ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И УСТАНОВКИ**

посвящена описанию экспериментальных методов, которые использовались для оптической регистрации ДС, а также определения магнитных параметров исследуемых образцов. Отмечены конструктивные особенности оптического криостата для наблюдения ДС при низких температурах, а также индукционной установки для измерения магнитной восприимчивости.

Большие возможности для исследований ДС в широкой спектральной области предоставляют цифровые устройства для регистрации оптической информации (фото- или WEB-камеры).

Фоточувствительным элементом в цифровых светоприемниках является кремниевая ПЗС матрица (прибор с зарядовой связью). Спектральная область чувствительности ПЗС матрицы лежит в диапазоне от нескольких единиц ангстрем (гамма и рентгеновское излучение) до 1100 нм. В настоящее время появились WEB-камеры с «продленной» инфракрасной чувствительностью, способные работать в области до  $\lambda = 1700$  нм. Цифровые светоприемники удобны также тем, что позволяют проводить непрерывную запись в течение большого промежутка времени. Такой способ регистрации позволяет многократно воспроизводить процесс и, таким образом, упростить обработку экспериментальных данных.

Наиболее удобными источниками монохроматического излучения являются светодиоды. В отличие от лазерного излучения свет от светодиодов не когерентный, и поэтому исключается появление интерференционных полос, искажающих изображение доменов.

Далее приводится описание магнитооптического стенда, на котором определялись углы поворота плоскости поляризации в эффектах Керра (полярного и меридионального) и Фарадея, а также дисперсионные зависимости в диапазоне длин волн от 400 до 1200 нм. На этом же стенде определялись кривые намагничивания, из которых устанавливались поле насыщения и коэрцитивная сила.

В работе кроме оригинальных устройств были использованы промышленные установки: СКВИД-магнитометр, магнитооптическая установка НАНОМОКИ, атомно-силовой микроскоп, EXSAFS-спектроскопия.

## **ГЛАВА 3 ДИНАМИКА НАМАГНИЧИВАНИЯ ПЛЕНОК $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$**

посвящена исследованию процессов намагничивания пленок магнитного полупроводника  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ . Отмечается, что интерес исследователей к магнитным полупроводникам или веществам, которые сочетают магнитное упорядочение с полупроводниковыми свойствами, обусловлен их уникальными физическими свойствами.

В начале главы приводится краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию влияния нестехиометрии и легирующих акцепторных и донорных примесей на свойства этого соединения.

Далее приводятся результаты по исследованию влияния нестехиометрии пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  на магнитные свойства. Показано, что с увеличением времени отжига пленок в атмосфере Cd константа магнитострикции  $\lambda_s$  сохраняет отрицательный знак и увеличивается по абсолютному значению.

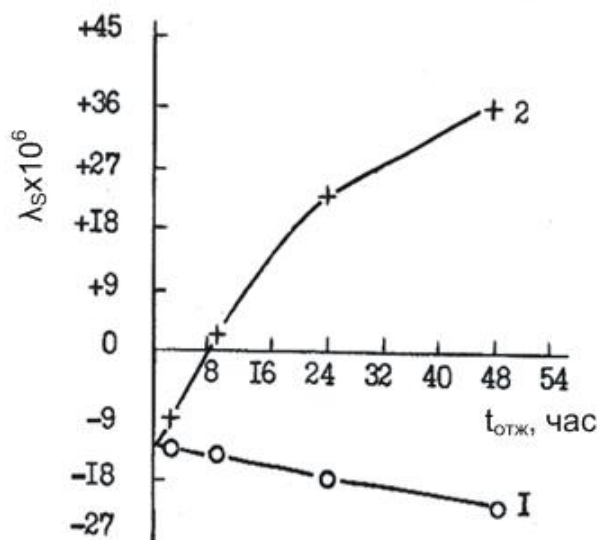


Рис. 1. Изменение константы магнитострикции от времени отжига в парах Cd (1) и Se (2).  $T=77\text{K}$ .

Отжиг в парах Se приводит к первоначальному уменьшению константы магнитострикции (вплоть до нулевых значений), и затем, с повышением времени отжига  $\lambda_s$  меняет знак на положительный и увеличивается по абсолютной величине (рисунок 1).

Наблюдаемые изменения  $\lambda_s$  анализируются в рамках одноионного приближения и связываются с наличием ионов  $\text{Cr}^{2+}$  и  $\text{Cr}^{4+}$ , обладающих сильным спин-орбитальным взаимодействием. Как следует из рисунка 2, магнитострикция является определяющим фактором величины коэрцитивной силы в пленках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ . При росте  $\lambda_s$  по абсолютной величине как в область отрицательных, так и положительных значений наблюдается рост коэрцитивной силы. Минимальная коэрцитивная сила наблюдается в пленках с магнитострикцией, близкой к нулю.

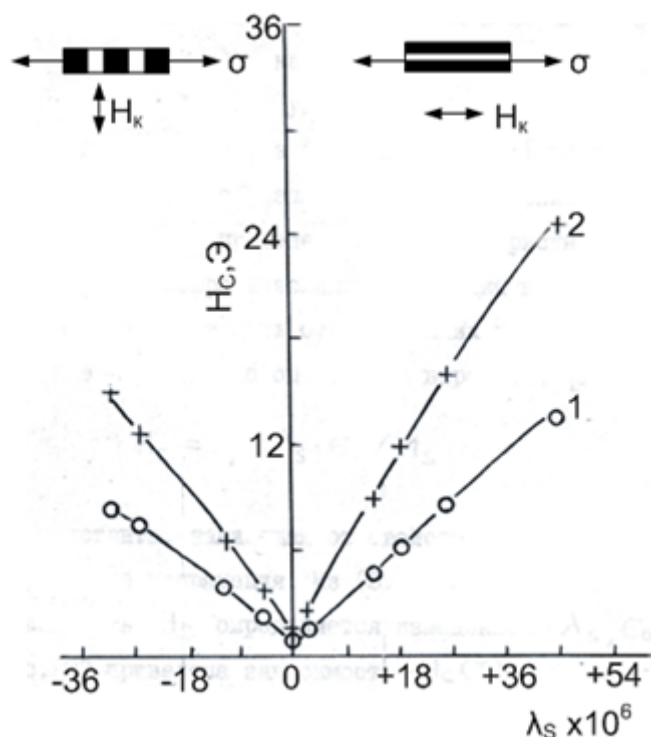


Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы от константы магнитострикции пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  при  $\sigma=0$  (1) и  $\sigma \neq 0$  (2). На вставках отмечены направления легких осей при одноосном растяжении.

Далее приведены результаты исследований динамики намагничивания пленок  $\text{GdCr}_2\text{Se}_4$  в переменных и постоянных магнитных полях. Отсутствие анизотропии в плоскости пленки приводит к тому, что ДС плохо воспроизводима и образуется из доменов случайной конфигурации. Для повторяемости результатов была получена периодическая ДС, которая создавалась с помощью искусственно наводимой в плоскости пленки одноосной магнитоупругой анизотропии.

Перемагничивание в малых полях позволяет обнаружить магнитную релаксацию в пленках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , которая проявляется в стабилизации доменных границ. Наличие этого эффекта приводит к тому, что амплитуда смещений доменной границы зависит от начальных условий, в которых находилась граница до приложения магнитного поля.

При выдержке образца в размагниченном состоянии в области границы образуется потенциальный барьер  $H_s$  (поле стабилизации), величина которого зависит от амплитуды смещения границы из начального положения (рисунок 3). Значение поля стабилизации растет с увеличением времени отжига пленки в атмосфере Se и уменьшается при отжиге в атмосфере Cd. На основании полученных данных сделано заключение, что стабилизация границ вызвана дефицитом Cd, который приводит в силу зарядовой нейтральности к появлению четырехвалентных ионов Cr.

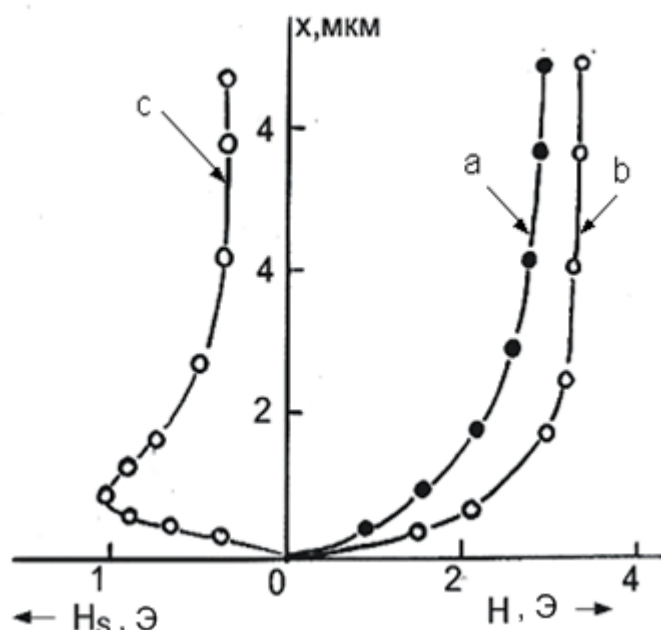


Рис. 3. Начальные участки кривых намагничивания пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  для нестабилизированных (а) и стабилизированных (б) ДГ. Слева показана зависимость поля стабилизации от амплитуды колебаний ДГ (с).

В § 3.6 представлен расчет поля стабилизации с учетом ионов  $\text{Cr}^{4+}$ . При записи гамильтониана учтено наличие тригональных искажений, вызванных вакансиями кадмия. Под действием таких искажений происходит расщепление основного терма иона  $\text{Cr}^{4+}$  в решетке  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  на два уровня - дублет и синглет. При дефиците Cd происходит смещение селена к ионам хрома, и энергия синглета будет увеличиваться, так как электронные орбитали ионов Cr, отвечающие синглету, находятся в одной плоскости с  $p$ -орбиталями Se. Орбитали дублета занимают плоскость перпендикулярную к ним и поэтому испытывают меньшее возмущение. Снятие вырождения дублета происходит под действием спин-орбитального взаимодействия, и вероятность заполнения отдельных уровней, соответствующих разным проекциям орбитального момента на направление магнитного момента, будет определяться энергией:

$$E = m_s(2\mu_B \cdot H_e - m \cdot \alpha \cdot \Lambda \cdot \cos\theta), \quad (1)$$

где  $H_e$  – обменное поле в магнетонах Бора,  $m_s$ ,  $m$  – проекция магнитного и углового моментов на выделенную ось,  $\alpha\Lambda$  – величина спин-орбитального расщепления,  $\theta$  – угол между вектором намагниченности и кристаллографической осью типа [111]. Из (1) следует, что энергия ионов  $\text{Cr}^{4+}$  минимальна при  $\theta=0$ .

Определены зависимости, которые устанавливают понижение свободной энергии кристалла вдоль главных направлений. В случае поликристалла проведено усреднение и определено выражение для энергии одноосной анизотропии  $W_U$ , которая индуцируется переходами ионов  $\text{Cr}^{4+}$  в энергетически выгодные узлы.

Удовлетворительное согласие теоретической и экспериментальной зависимостей поля стабилизации от температуры наблюдается при значении  $\alpha\Lambda = 15,8 \text{ см}^{-1}$  (рисунок 4).

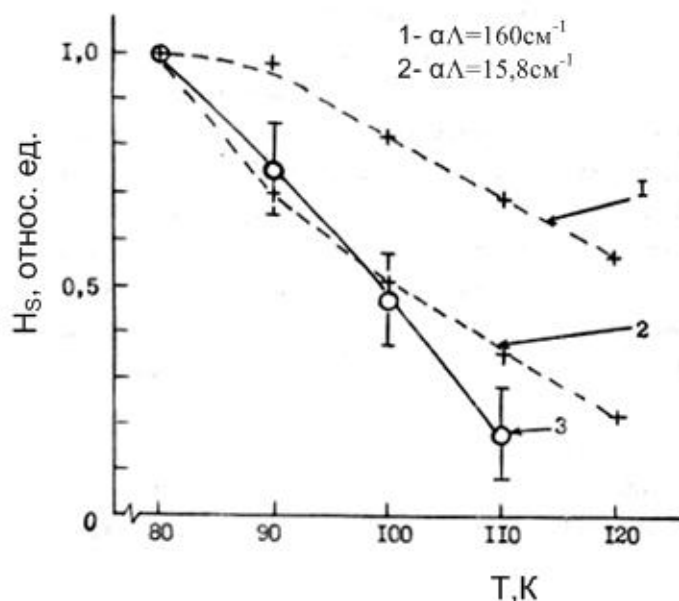


Рис. 4. Теоретические (1), (2) и экспериментальная (3) зависимости поля стабилизации от температуры.

#### ГЛАВА 4 МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ, ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА И ФОТОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В БОРАТЕ ЖЕЛЕЗА

посвящена исследованию процессов перемagnetизации, доменной структуры слабого ферромагнетика  $\text{FeVO}_3$  и влияния на них света. Отмечается, что, несмотря на то, что это соединение достаточно интенсивно исследовалось с момента его создания, многие эффекты, обнаруженные в нем, остаются необъясненными до сих пор. Так, невыясненным остается появление полосовой структуры в борате железа при низких температурах [3] и ее движение под действием света [4].

В § 4.1 приведены результаты исследований начальной магнитной восприимчивости  $\chi$  в области от температуры Нееля до 77 К. Показано, что этот диапазон температур можно разделить на две области, которые отличаются температурной зависимостью  $\chi$ . В высокотемпературной области с понижением температуры восприимчивость монотонно уменьшается и достигает минимума при  $T \sim 180 \text{ К}$  (рисунок 5). С дальнейшим понижением температуры  $\chi$  увеличивается и при температурах, близких к жидкому азоту, превышает значение восприимчивости при комнатной температуре.

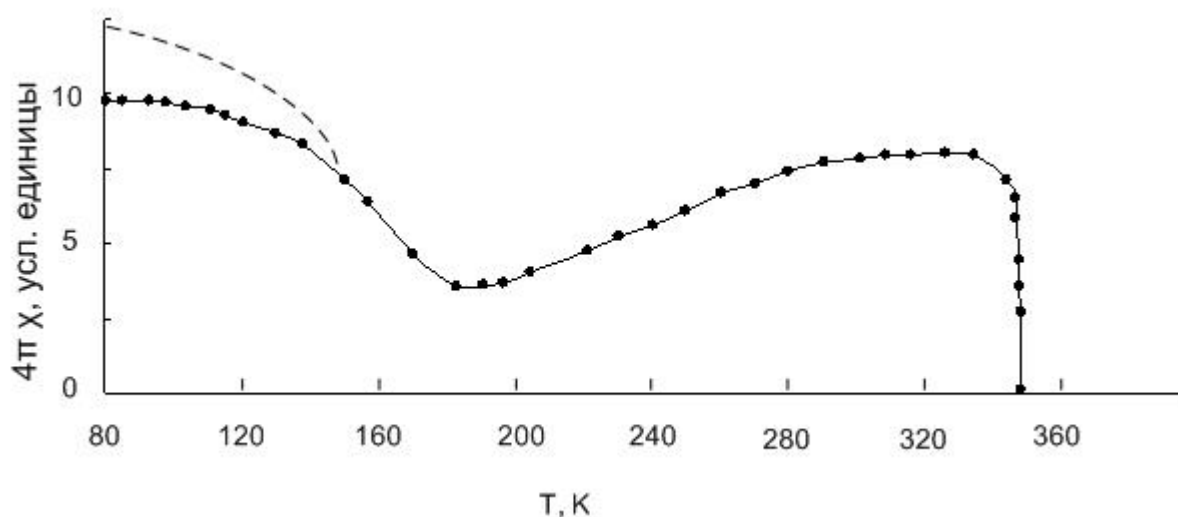


Рис. 5. Температурная зависимость начальной магнитной восприимчивости  $\text{FeVO}_3$ . Пунктирной линией показана восприимчивость при воздействии света.

Определена специфика релаксационных процессов, которые проявляются в каждой из указанных областей. В высокотемпературной области магнитная релаксация проявляется в температурной зависимости мнимой части восприимчивости  $\chi''$ , которая устанавливалась на различных частотах магнитного поля при непрерывном изменении температуры (рисунок 6), в низкотемпературной области – в дезаккомодации магнитной восприимчивости, которая определялась при фиксированных температурах (рисунок 7).

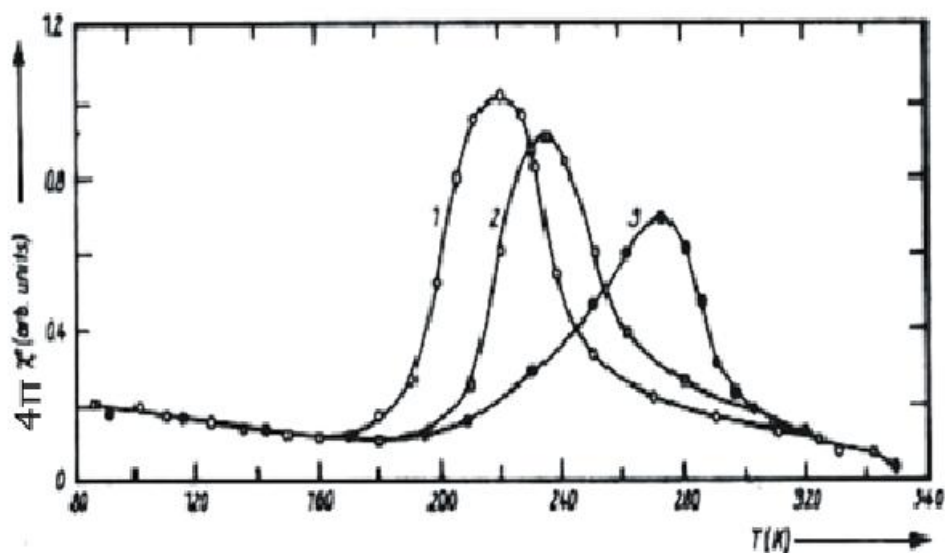


Рис. 6. Температурная зависимость мнимой части обратной магнитной восприимчивости в  $\text{FeVO}_3$  при  $\nu=36$  (1), 120 (2) и 470 Гц (3).



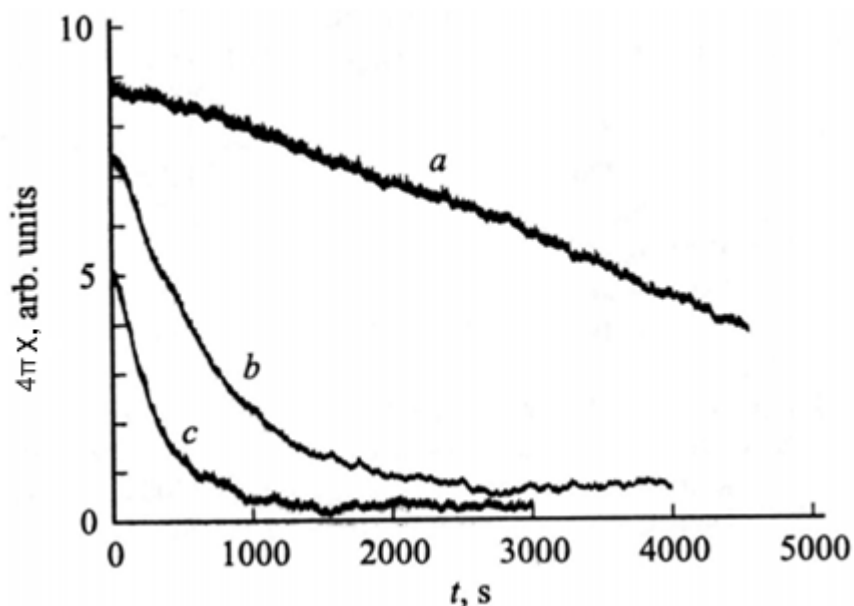


Рис. 7. Дезаккомодация начальной магнитной восприимчивости бората железа при 128 К (a), 149 К (b), 157 К (c).

Близость значений энергии активации, которые определены в области высоких и низких температур и составляют соответственно 0,27 и 0,3 эВ, с учетом погрешности измерений, свидетельствует о том, что оба эффекта вызваны одними и теми же процессами, стабилизирующими доменные границы. Полученные результаты анализируются в рамках двухцентровой модели, в которой предполагается, что магнитная релаксация в  $\text{FeBO}_3$ , также как и в ферритах-шпинелях, осуществляется с участием электронного обмена между разновалентными ионами железа.

§ 4.2 посвящен выяснению основных особенностей стационарной полосовой структуры, которая образуется при низких температурах и представляет собой периодическое чередование светлых и темных полос с плавным изменением светового контраста между ними. Показано, что появление полос не является результатом интерференции оптических эффектов Фарадея и двулучепреломления, как предполагалось в работе [3]. В случае интерференции период полосовой структуры  $\Lambda$  должен зависеть от угла падения света на плоскость пластины  $\alpha$  и длины волны света (рисунок 8, а). Из экспериментальных данных следует, что  $\Lambda$  не зависит от  $\alpha$  (рисунок 8, б).  $\Lambda$  также не зависит от длины волны света.

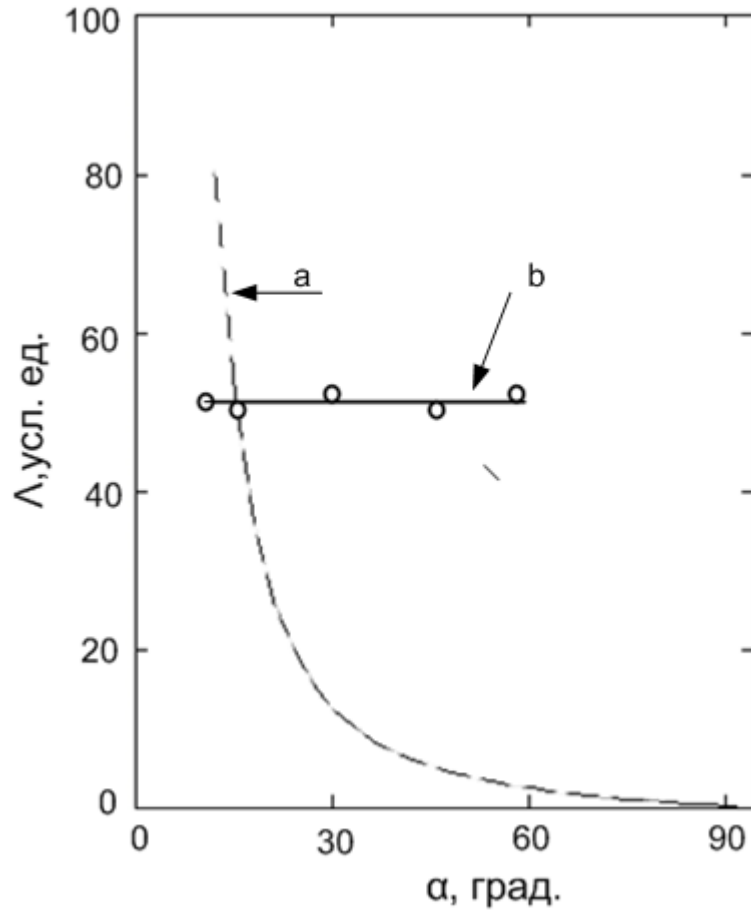


Рис. 8. Зависимость периода полосовой структуры согласно модели [3] (a) и экспериментальным данным (b).

Полученный результат указывает на то, что наблюдаемая структура имеет магнитную природу и связана с пространственным распределением намагниченности. Этот вывод подтверждается зависимостью  $\Lambda$  от геометрических размеров образцов, а также величины магнитного поля. Предполагается, что причиной появления полосовой структуры в борате железа является периодическое отклонение вектора ферромагнетизма  $m$  из базовой плоскости кристалла. В соответствии с терминологией, принятой в [1], наблюдаемые структуры могут быть определены как неоднородные магнитные структуры (НМС).

Показано, что в приближении гармонической зависимости угла отклонения магнитного момента от базовой плоскости или  $\gamma = \gamma_0 \sin(2\pi \frac{x}{\Lambda})$ , минимум полной энергии для НМС будет наблюдаться при условии:

$$\frac{\partial E}{\partial \Lambda} = -\frac{4\pi^2 A^2}{\Lambda^3} + \frac{m^2}{4d} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi d}{\Lambda}\right) \right] - \frac{\pi m^2}{2\Lambda} \exp\left(-\frac{2\pi d}{\Lambda}\right) = 0, \quad (2)$$

где  $d$  – толщина образца (размер вдоль оси  $c$ ),  $A$  – константа обменного взаимодействия.

Зависимость периода полосовой структуры от толщины образца, которая определена из (2) для  $\text{FeVO}_3$  при  $T = 78 \text{ К}$  ( $A = 10^{-6} \frac{\partial p_2}{\partial m^2}$  и  $m = 17 \text{ Гс}$ ), находится в согласии с экспериментальными данными (рисунок 9).

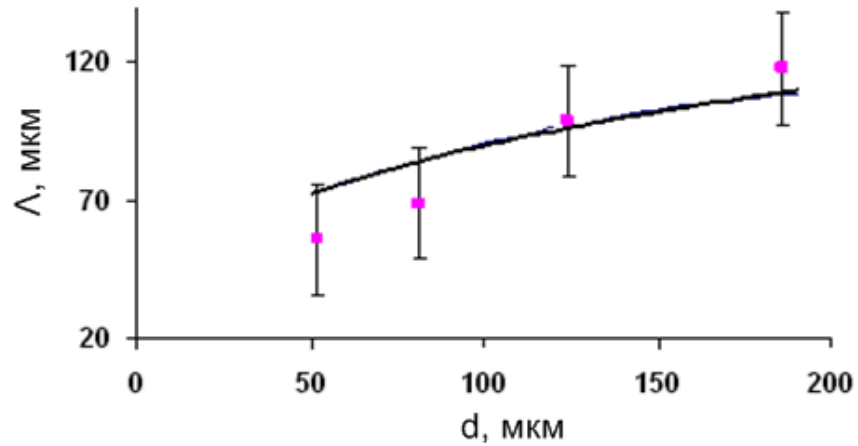


Рис. 9. Зависимость периода НМС от толщины образцов, определяемая из (2). Точки соответствуют экспериментальным данным.

В номинально чистых кристаллах гематита полосовые структуры наблюдаются при комнатных температурах (рисунок 10). Они обладают всеми теми же особенностями, которые характерны для НМС в борате железа.

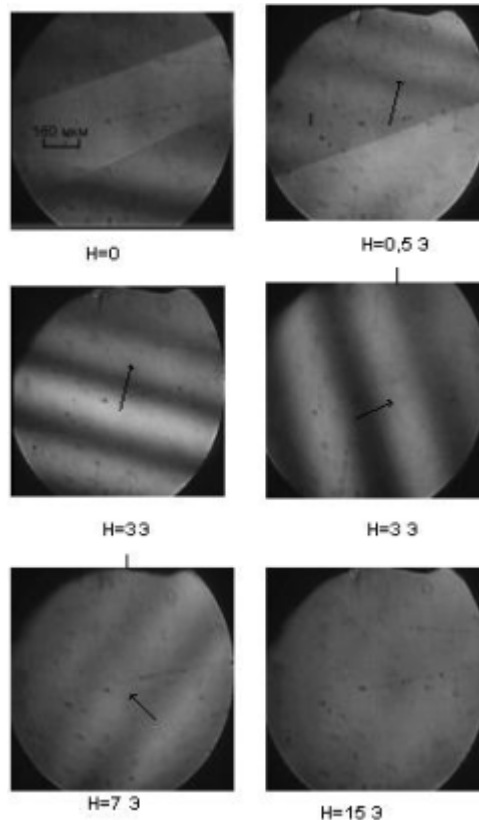


Рис. 10. Неоднородные магнитные структуры в гематите.  $T=300\text{К}$ .

В § 4.3 приведены результаты исследований фотоиндуцированных автоколебаний НМС в борате железа при низких температурах. Автоколебания можно наблюдать с помощью поляризационного микроскопа, и зрительно они выглядят в виде синхронного движения полос в НМС сначала в одном, а затем в обратном направлении.

Этот эффект несколько отличается от автоволнового движения намагниченности, которое впервые обнаружено в  $\text{FeBO}_3:\text{Ni}$  в [4]. Автоволновая структура возникает при освещении кристалла, в то время как автоколебания проявляются на стационарной НМС при уменьшении температуры ниже 148 К.

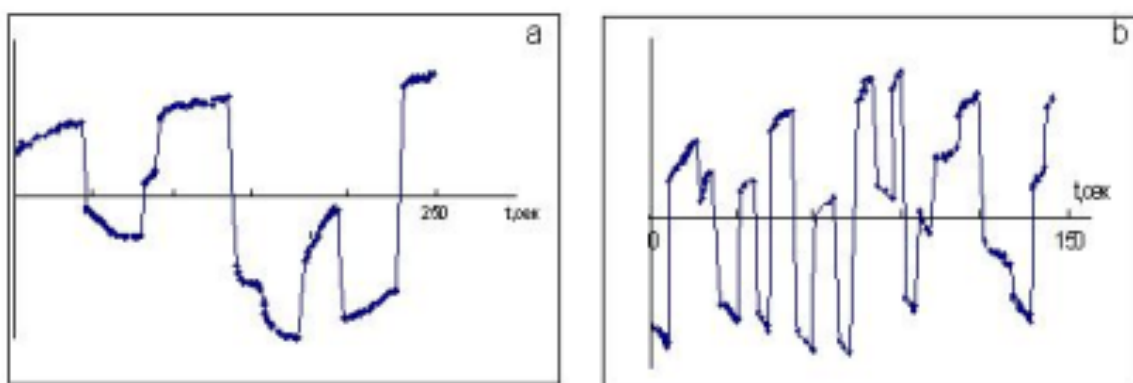


Рис. 11. Оптические сигналы, вызванные автоколебаниями неоднородных магнитных структур под действием света при а)  $I=10 \text{ мВт/см}^2$ ; б)  $I=40 \text{ мВт/см}^2$ .  $T=77 \text{ К}$ .

Из формы электрических сигналов (рисунок 11), вызванных движением полос, следует вывод, что движение полос носит случайный характер, а их импульсная форма свидетельствует о том, что смещение полос к новым положениям осуществляется скачками в течение короткого времени. При этом между каждым отдельным скачком наблюдается релаксационный процесс с существенно более длительным временем  $\tau$ , величина которого зависит от интенсивности освещения  $I$ . Рост интенсивности освещения приводит к увеличению частоты скачков и уменьшению  $\tau$ .

Визуальные наблюдения при малой интенсивности подсветки позволяют установить динамические изменения, которые вызывает свет в НМС в различные моменты времени.

Исходная структура до освещения показана на рисунке 12, а. В течение некоторого времени с момента освещения положение полос не меняется, но наблюдается постепенное размытие всей полосовой структуры, вплоть до ее полного исчезновения (рисунок 12, б). Затем в течение короткого времени возникает новая полосовая структура (рисунок 12, с), в которой полосы ориентированы в том же направлении и имеют ту же ширину, но со смещением всех полос относительно первоначального положения.

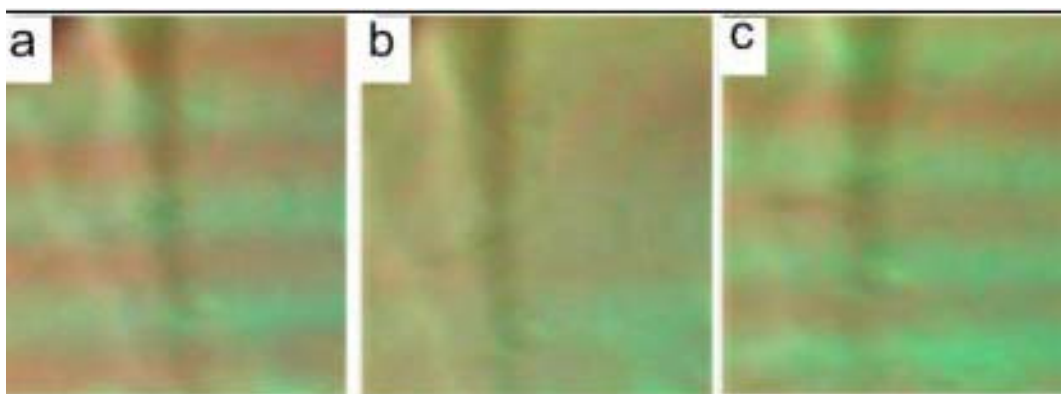


Рис. 12. Динамика фотоиндуцированных изменений НМС в борате железа.  
 $T = 77 \text{ K}$ .

Если согласовать наблюдаемые изменения НМС с формой электрических сигналов, то можно установить, что релаксационный процесс длительностью  $\tau$  в элементарном сигнале соответствует «размытому» состоянию НМС (рисунок 12 b); быстрый процесс, определяемый скачком сигнала, соответствует переходу от (b) к (c).

Далее предлагается возможный механизм возникновения фотоиндуцированных автоколебаний в борате железа, согласно которому автоколебания представляются периодическими переходами вектора намагниченности из устойчивых в неустойчивые состояния.

Устойчивым является состояние, которое соответствует минимуму энергии, определяемому уравнением (2). Отсутствие полос в состоянии (b) можно объяснить тем, что вектор ферромагнетизма под влиянием света полностью укладывается в базовую плоскость, вследствие чего исчезают магнитные заряды на поверхности пластины, которые являлись причиной образования НМС. Затем намагниченность вновь выходит из базовой плоскости, что приводит к появлению магнитных зарядов и новой неоднородной магнитной структуры, в которой возможно смещение темных и светлых полос относительно первоначального положения. Такие изменения в ориентациях намагниченности зрительно представляются как смещение всех полос.

Переход в неустойчивое состояние объясняется тем, что в борате железа фотоиндуцированная анизотропия ортогональна вектору ферромагнетизма. При освещении намагниченность отклоняется от выделенного направления в базовой плоскости, вдоль которого наблюдается появление НМС.

В предлагаемой модели фотоиндуцированные колебания полосовых структур в борате железа связываются с двумя физическими механизмами: фотоактивацией электронов по различным центрам (ловушкам) и их релаксацией по неэквивалентным позициям относительно направлений спинов. Фотоактивация электронов вызывает появление магнитной анизотропии с легкой осью, перпендикулярной вектору ферромагнетизма, что приводит к его отклонению от первоначального направления. Второй процесс приводит к обратному эффекту - термическая релаксация электронов

вызывает наведенную анизотропию, которая стремится сохранить исходное магнитное состояние.

Отсюда следует вывод, что период колебаний полосовых структур определяется временем релаксации наведенной анизотропии при освещении или временем перехода намагниченности от устойчивого состояния, стабилизированного наведенной анизотропией, к неустойчивому, вызванному фотоиндуцированной анизотропией.

**В ГЛАВЕ 5 МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ Co-P, ПОЛУЧЕННЫХ ХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ,** приведены результаты исследований магнитных свойств поликристаллических и аморфных пленок на основе сплавов Co-P, полученных химическим осаждением. Отмечается, что химический способ получения пленок привлекателен своей простотой, низкой себестоимостью, а также тем, что позволяет получать однородные по толщине пленки на поверхности любой конфигурации.

В первой части рассмотрены свойства поликристаллических пленок в области нанотолщин. Отмечается, что тонкие поликристаллические магнитные пленки Co с добавкой фосфора отличаются тем, что проявляют многообразие физических свойств в зависимости от микроструктуры и содержания фосфора.

Вид петель гистерезиса пленок Co-P (рисунок 13, а), а именно, их прямоугольность и большая остаточная намагниченность, указывают на то, что с увеличением толщины меняется характер перемагничивания. Форма кривой перемагничивания в образце толщиной 4 нм связана с влиянием подложки.

При увеличении толщины пленки перемагничивание вначале происходит по механизму Стонера-Вольфарта с характерной петлей гистерезиса. При толщине больше 10 нм форма петель гистерезиса становится близкой к прямоугольной, что отражает изменение характера перемагничивания и связывается с изменением структуры пленок.

Такое предположение подтверждается толщинной зависимостью поля насыщения полярного эффекта Керра  $H_S$ . Значение  $H_S$  монотонно растет с увеличением толщины и стремится к постоянному значению в области больших толщин.

В общем случае значение поля насыщения при намагничивании пленки в направлении перпендикулярном плоскости определяется размагничивающим полем и возможным наличием перпендикулярной анизотропии. Форма петель гистерезиса в плоскости пленки и перпендикулярном к ней направлении (рисунок 13, б) указывает на то, что в области толщин от 4 нм до 30 нм в пленках Co-P перпендикулярная анизотропия отсутствует. Отсюда следует, что изменение поля насыщения отражает толщинную зависимость намагниченности насыщения.

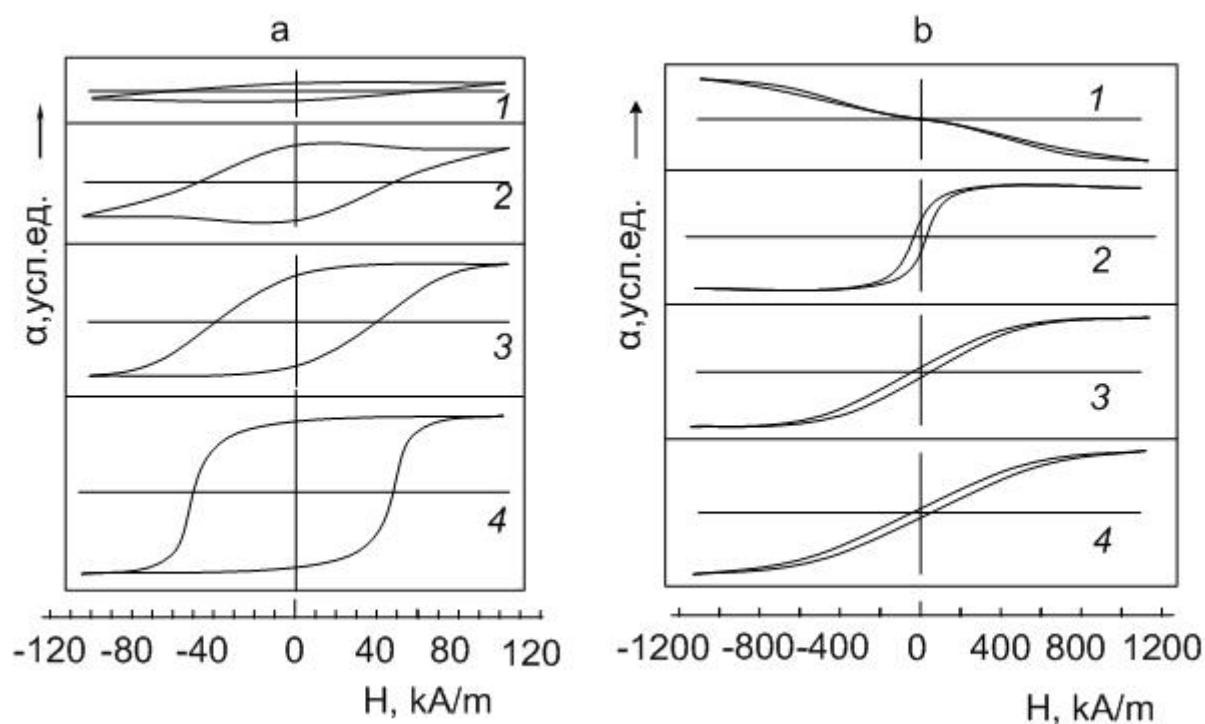


Рис. 13. Петли гистерезиса пленок Co-P, полученные с помощью меридионального (а), полярного эффектов Керра (б), для толщин (1) – 4 нм, (2) – 7,5 нм, (3) – 10,5 нм, (4) – 30 нм.

В диссертации приведены петли гистерезиса для разных толщин, которые получены с помощью СКВИД-магнитометра. Наблюдаемое изменение формы петель гистерезиса подтверждает выводы, которые были сделаны на основе магнитооптических измерений.

Из приведенных результатов следует вывод, что при толщинах меньше 10 нм пленки Co-P, полученные химическим осаждением, состоят из островков со случайной ориентацией осей легкого намагничивания. С повышением толщины пленки происходит рост островков, и затем их слияние с образованием однородного слоя. В соответствии с такими структурными превращениями происходит изменение механизмов перемагничивания пленок. В области малых толщин перемагничивание осуществляется вращением магнитных моментов кристаллитов. При увеличении толщины выше 10 нм процесс перемагничивания происходит с образованием доменов обратной намагниченности и движением доменных границ.

Этот вывод подтверждается прямыми наблюдениями изменений морфологии поверхности пленок, которые осуществлялись с помощью атомно-силового микроскопа. Установлено, что поверхность пленок Co-P имеет неоднородный зернистый вид. При этом средний размер зерна  $r$  зависит от толщины пленки и изменяется с ее ростом немонотонным образом. Так, в пленке толщиной 4 нм значение  $r$  составляет  $\sim 50$  нм, для пленки толщиной 7,5 нм  $r \sim 80$  нм. В образце толщиной 10,5 нм значение  $r$  около 40 нм. Дальнейшее увеличение толщины вновь приводит к

укрупнению зерен, и для пленки с толщиной 30 нм  $\rho \sim 70$  нм. Как показано в следующей главе диссертации, наблюдаемые изменения  $\rho$  объясняют релаксационные эффекты в трехслойных пленках, в которых ВК слой образован на основе поликристаллического сплава Co-P.

В § 5.3. приведены результаты исследований магнитооптических свойств поликристаллических пленок Co-P. Показано, что изменение угла вращения полярного эффекта Керра от толщины пленки имеет немонотонный вид (рисунок 14), который усиливается с ростом длины волны.

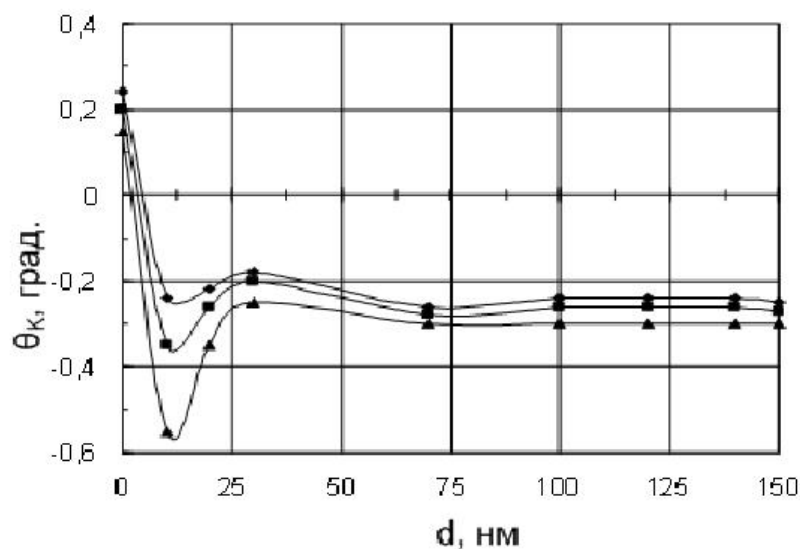


Рис. 14. Зависимость полярного эффекта Керра от толщины пленок для длин волн:  $\blacktriangle$  – 900 нм;  $\blacksquare$  – 600 нм;  $\blacklozenge$  – 400 нм.

Представлен формальный расчет магнитооптического вращения плоскости поляризации при отражении падающего света, в котором учитывается вклад эффекта Фарадея. На основе полученных данных сделаны выводы:

- 1) полученная толщинная зависимость полярного эффекта Керра в основном определяется многократными отражениями в слое Co-P;
- 2) введение фосфора незначительно изменяет величину эффекта Керра пленок Co.

Экспериментально найденная величина удельного магнитооптического эффекта Фарадея в пленках Co-P в области нанотолщин на длине волны 500 нм составляет  $\sim 4,38 \cdot 10^5$  град/см, что почти в два раза выше, чем в пленках Co, полученных вакуумным напылением. Наиболее вероятной причиной наблюдаемого усиления эффекта Фарадея является спиновая поляризация Pd, который используется в качестве подслоя при получении пленок по химической технологии. Как известно, ионы Pd обладают высокой парамагнитной восприимчивостью. В окружении ионов Co ионы Pd приобретают магнитный момент и поэтому могут вносить дополнительный вклад в магнитооптическое вращение.



Далее приведены результаты исследований аморфных пленок Co-P и Co-Ni-P, полученных химическим осаждением. Содержание фосфора в пленках Co-P составляло 5,5 вес. %. В пленках Co-Ni-P содержание элементов составляло (вес. %) Co – 70, Ni – 25, P – 5. Аморфность структуры пленок устанавливалась с помощью EXAFS-спектрометрии, которая дополнялась рентгеновской малоугловой спектрометрией и спектром поглощения ядерного спинового эха.

Определена специфика намагничивания и формирования ДС при наличии и в отсутствие наведенной анизотропии. Показано, что причиной роста коэрцитивной силы в пленках, которые получены в отсутствие внешнего поля, является стабилизация доменных границ, вызванная релаксационными процессами. Это связано с тем, что в отсутствие магнитного поля в пленке в процессе осаждения может образоваться доменная структура, а, следовательно, и ДГ. Тогда наведенная анизотропия, вызванная направленным упорядочением атомов, будет стабилизировать исходную магнитную конфигурацию, что приведёт к закреплению ДГ и росту  $H_c$ .

При получении пленки в магнитном поле магнитная анизотропия будет наводиться в направлении, совпадающем с направлением поля. В совокупности с тем, что в аморфных пленках локальная анизотропия отсутствует или имеет небольшие значения, появление одноосной анизотропии приводит к очень малой угловой дисперсии намагниченности.

Такая специфика аморфных пленок Co-P с наведенной анизотропией отражается на форме петель гистерезиса (рисунок 15) вдоль различных направлений магнитного поля относительно ОЛН.

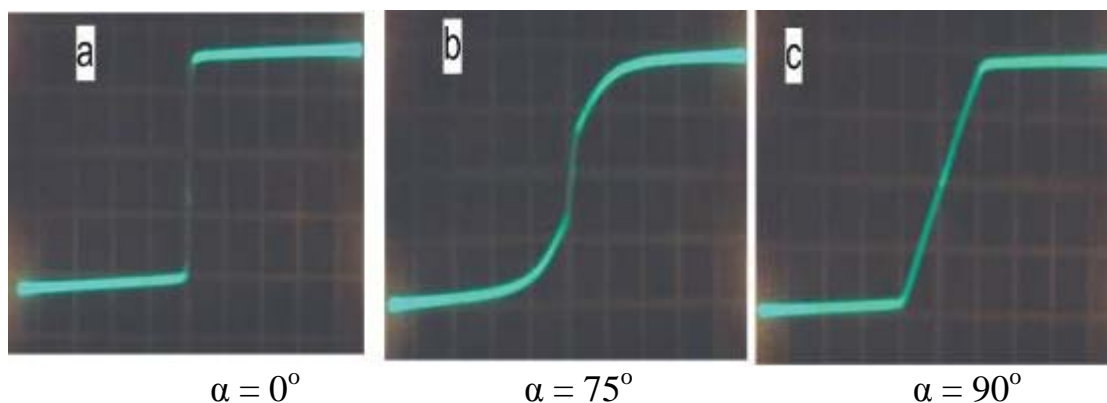


Рис.15. Форма петель гистерезиса в плоскости пленки при различных направлениях магнитного поля относительно ОЛН.

Искажение формы петли гистерезиса в промежуточном направлении, между трудным и легким ( $\alpha = 75^\circ$ ) связана с тем, что поле одноосной анизотропии  $H_K$  значительно превышает коэрцитивную силу. Поэтому при наложении магнитного поля под углом к легкой оси начальный этап

намагничивания осуществляется смещением доменных границ и насыщением пленки вдоль ОЛН.

Последующее намагничивание происходит поворотом магнитного момента по направлению поля, что отражается пологой частью петли гистерезиса. На основе полученных результатов делается заключение, что наведенная анизотропия имеет определяющее значение в магнитных свойствах как анизотропных, так и изотропных аморфных пленок Co-P и Co-Ni-P.

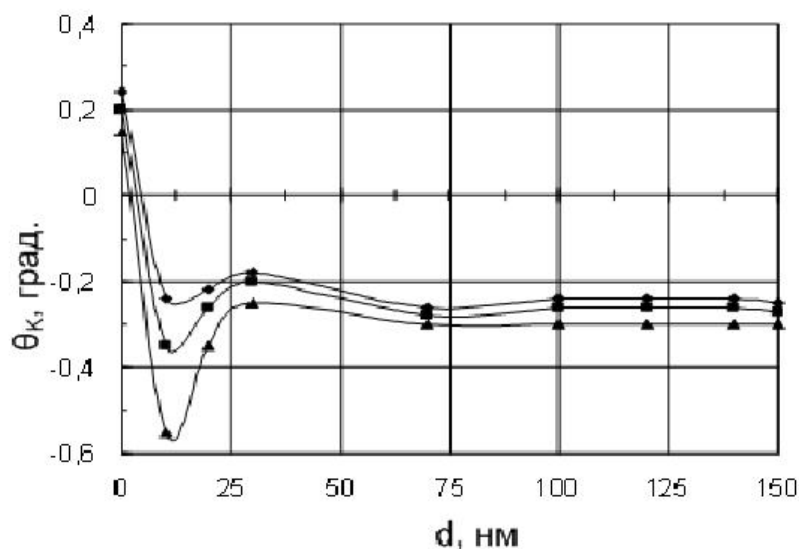


Рис. 16. Расчетные и экспериментальная зависимости коэрцитивной силы от толщины пленки.

Далее показано, что анизотропные аморфные пленки на основе сплава Co-P могут быть модельными образцами для исследований толщинных изменений коэрцитивной силы и структуры ДГ. Толщинная зависимость коэрцитивной силы (рисунок 16) хорошо определяется изменением структуры ДГ от неелевского к блоховскому типу. На основе представлений о взаимосвязи энергии ДГ с их типом проведены количественные оценки ширины границ  $\delta$  при различных толщинах пленки.

**ГЛАВА 6** МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СЭНДВИЧ-СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ ХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ, посвящена исследованию магнитных свойств этих структур. Приводится краткий обзор работ по исследованию однонаправленной анизотропии, которая проявляется при обменном взаимодействии магнитных слоев с разной коэрцитивной силой. Отмечается привлекательность метода химического осаждения для создания трехслойных структур.

Исследуемые пленки представляют сэндвич-структуру, состоящую из высококоэрцитивного и низкокоэрцитивного слоев, которые разделены немагнитной прослойкой (рисунок 17). ВК изотропный слой изготовлен из поликристаллического Co-P с содержанием P ~ 2,5 вес. %; НК анизотропный слой - из аморфного сплава Co-P с содержанием P ~ 5,5 вес. %. Промежуточный немагнитный слой выполнен из аморфного сплава Ni-P с содержанием фосфора ~ 10 вес. %.

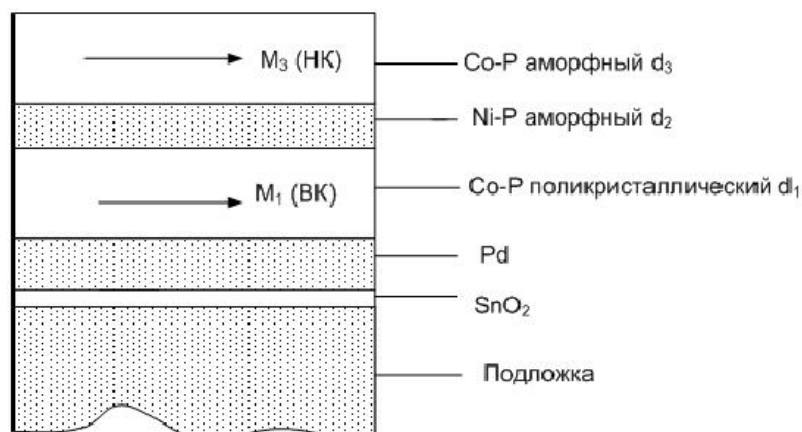


Рис.17. Сэндвич-структура, содержащая ферромагнитные ВК и НК слои, полученная химическим осаждением.

Магнитные свойства трехслойных структур зависят как от параметров магнитных слоев, так и немагнитной прослойки. В работе приведены данные, определяющие влияние толщины этих слоев на поле смещения  $H_E$  и коэрцитивную силу.

Сопутствующим явлением обменного взаимодействия как в случае ФМ-АФМ, так и двух взаимодействующих ФМ слоев с различной коэрцитивной силой является увеличение коэрцитивной силы. В работе показано, что толщинная зависимость коэрцитивной силы исследуемых обменно-связанных структур может носить немонотонный вид (рисунок 18).

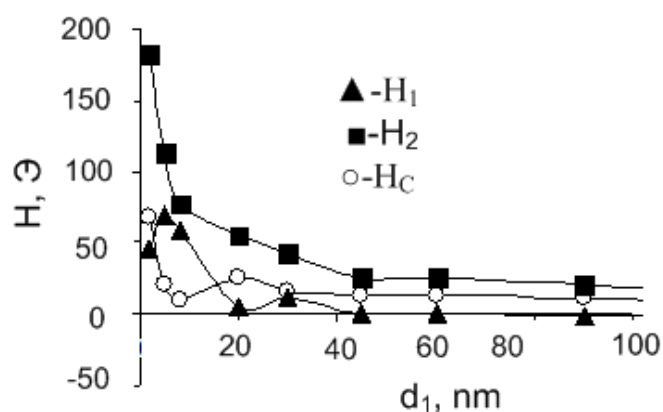


Рис. 18. Зависимость критических полей и коэрцитивной силы от толщины низкокоэрцитивного слоя.

Немонотонность в изменении  $H_C$  связывается с различием толщинных зависимостей критических полей  $H_1$  и  $H_2$ , которые соответствуют нисходящей и восходящей ветвям петли гистерезиса. До толщины НК слоя  $\sim 5$  нм  $H_1$  растет, достигает максимума и затем уменьшается, в то время как  $H_2$  монотонно уменьшается с ростом толщины этого слоя. Показано, что отличия в изменениях критических полей от толщины НК слоя связаны с взаимодействием магнитных слоев.

На основе полученных результатов можно сделать заключение, что при расчетах коэрцитивной силы в обменно-связанных структурах наряду с несовершенством интерфейса, который приводит к случайному распределению полей, удерживающих ДГ в местах с локальным минимумом энергии, необходимо учитывать различие механизмов перемагничивания мягкого слоя при разных ориентациях магнитного поля относительно намагниченности жесткого.

В § 6.3 исследуются причины релаксационного уменьшения поля смещения и коэрцитивной силы исследуемых трехслойных пленок, которое наблюдается при перемагничивании НК слоя. Динамические изменения петли гистерезиса в зависимости от времени перемагничивания приведены на рисунке 19. Петли гистерезиса регистрировались с момента времени  $\tau = 0$ , до которого пленка находилась в насыщенном состоянии, и в последующие моменты времени при непрерывном перемагничивании низкокоэрцитивного слоя. С ростом циклов перемагничивания наблюдается уменьшение поля смещения петли гистерезиса НК слоя вплоть до его исчезновения.

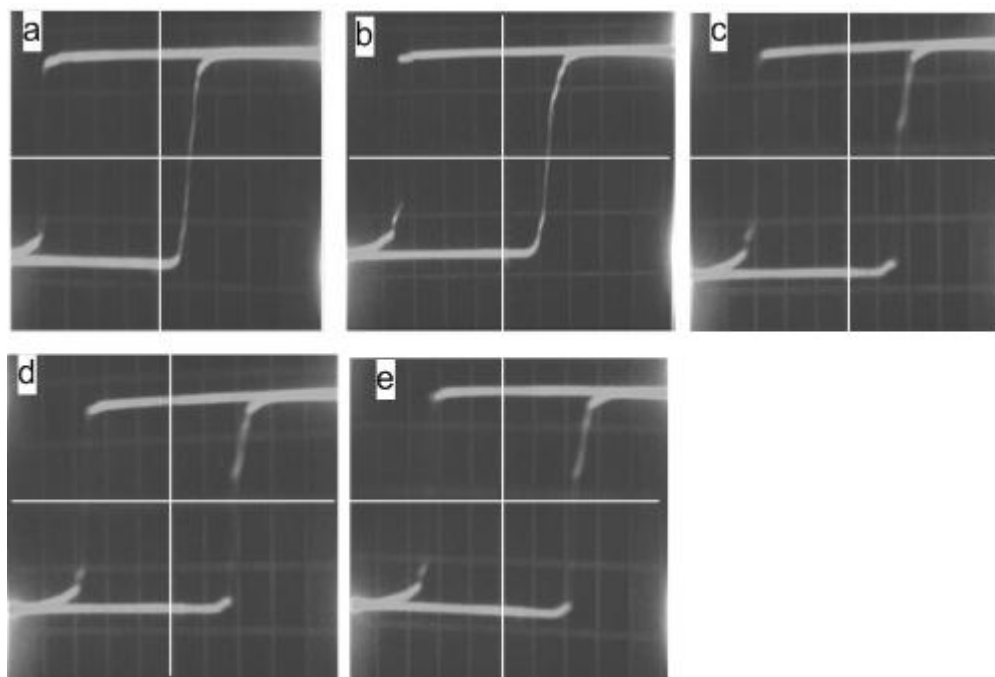


Рис. 19. Петли гистерезиса трехслойной пленки при различных временах воздействия переменного магнитного поля: **a** –  $\tau = 0$  с; **b** –  $\tau = 7$  с; **c** –  $\tau = 16$  с; **d** –  $\tau = 60$  с; **e** –  $\tau = 540$  с.

Показано, что причиной наблюдаемого эффекта является размагничивание ВК слоя, вызванное тепловыми флуктуациями.

В соответствии со свойствами пленок поликристаллического сплава Со-Р, ВК слой до толщины меньше 10 нм будет состоять из слабо связанных между собой анизотропных частиц Со-Р со случайной ориентацией ОЛН. Энергия такой частицы при наличии межслоевого обменного взаимодействия может быть представлена в виде:

$$E = K_i v_i \sin^2 \varphi_i - \vec{a}_i \cos \theta_i, \quad (3)$$

где  $K_i$  – константа анизотропии частицы;  $v_i$  – ее объем;  $e_i$  – энергия связи;  $\varphi_i$  – угол между намагниченностью и ОЛН частицы;  $\theta_i$  – угол между магнитным моментом частицы и намагниченностью мягкого слоя.

В исходном состоянии пленка намагничена внешним полем вдоль направления легкого намагничивания магнитомягкого слоя, и магнитные моменты всех частиц параллельны намагниченности этого слоя. При перемагничивании мягкой пленки знак энергии связи в уравнении (3) меняется на противоположный. Это приводит к повышению энергии частиц, и в том случае, если их размеры достаточно малы и они слабо связаны, то под действием термических флуктуаций магнитные моменты частиц жесткого слоя будут ориентироваться вдоль своих локальных ОЛН. Вследствие того, что такой процесс имеет активационную природу, то переориентация магнитных моментов в локальной области будет происходить релаксационным образом в течение промежутка времени, определяемого энергией активации. Таким же образом будет меняться поле смещения петли гистерезиса НК слоя, что проявляется в виде ее релаксационного смещения относительно нулевого значения внешнего магнитного поля.

**ГЛАВА 7 ПОЛУЧЕНИЕ СЭНДВИЧ-СТРУКТУР С ТРЕБУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ** посвящена практическому использованию полученных результатов.

В § 7.1 отмечается, что межслоевой обмен в трехслойных пленках во многом определяется качеством поверхности немагнитной прослойки, которая разделяет ФМ слои, и показана возможность значительного улучшения интерфейса в трехслойных пленках при использовании химического осаждения для их получения.

В пленках с НК слоем из Со-Р поле смещения уменьшается с ростом толщины прослойки  $d_2$ , при этом двукратное уменьшение  $H_E$  по сравнению с его значением в отсутствие прослойки наблюдается при  $d_2 \sim 5$  нм. В пленках, в которых НК слой получен из сплава Со-Ni-P, происходит более резкое уменьшение поля смещения: двукратное уменьшение  $H_E$  наблюдается при  $d_2 \sim 1$  нм, величина  $H_E$  уменьшается от 50 Э до 5 Э при изменении  $d_2$  от 0 до 1 нм (рисунок 20).

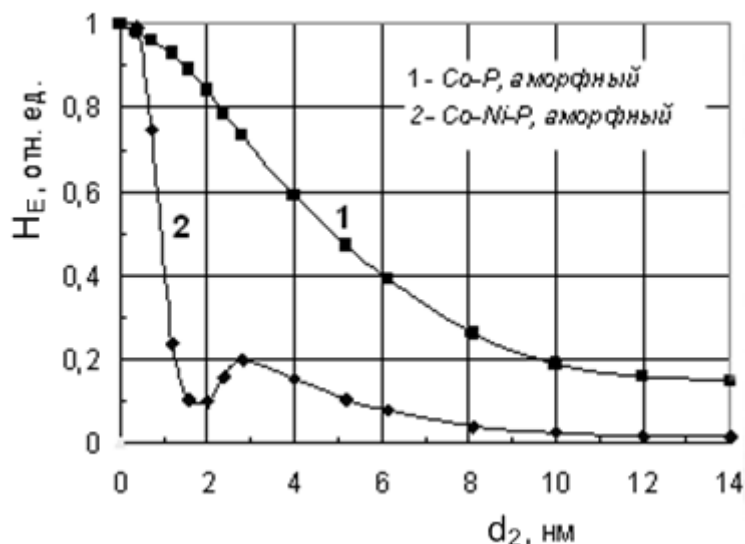


Рис. 20. Зависимость поля смещения от толщины прослойки трехслойных пленок с различными НК слоями.

Отличие в зависимостях поля смещения от толщины прослойки указывает на то, что введение атомов Ni в сплав Co-P приводит к значительному улучшению качества интерфейса на границе НК – НМ слоев.

Известно, что в сплаве Co-P фосфор не является примесью внедрения и в основном распределяется по границам зерен. Это приводит к тому, что области, обогащенные кобальтом, будут разделены прослойкой фосфора. Та же самая ситуация будет наблюдаться и в сплавах Ni-P. Тогда в интерфейсе аморфных слоев CoP/NiP может образоваться сплав Co-Ni. Добавка Ni при получении НК слоя изначально создает Co-Ni связи, что препятствует образованию связей между атомами Co и Ni в интерфейсе.

Такие особенности фосфидных сплавов с Co и Ni могут служить объяснением различий интерфейсов в двух случаях: а) между слоями CoP/NiP и б) между слоями CoNiP/NiP.

Взаимодействие между магнитными слоями, которое наблюдается в случае НК слоя, выполненного из сплава Co-P, во многом определяется нарушением интерфейса на границе НК – НМ слоев. Наиболее вероятной причиной такого нарушения может быть взаимная диффузия атомов Co и Ni в интерфейс и образование магнитного сплава Co-Ni, что может привести к эффективному уменьшению толщины НМ прослойки и прямому взаимодействию магнитных слоев. Введение Ni в сплав Co-P устраняет образование сплава CoNi на границе НК – НМ слоев, тем самым стабилизируется толщина немагнитной прослойки и улучшается качество интерфейса.

Приводятся возможные механизмы, которые могут вызвать изменения поля насыщения при намагничивании пленки в направлении перпендикулярном плоскости:

а) неровность интерфейса, разделяющего магнитные слои (механизм Нееля);

б) несплошность слоев и появление внутри НК слоев участков высококоэрцитивной фазы [5];

с) межслоевое обменное взаимодействие, которое связано со спин-поляризованными электронами проводимости в металлической прослойке.

В § 7.2 рассматривается трехслойная структура с симметричными магнитными слоями, полученная химическим осаждением. Она состоит из двух аморфных слоев Co-P одинаковой толщины и промежуточной немагнитной прослойки из Ni-P. С ростом толщины промежуточного слоя  $d_2$  от 0 до 2 нм коэрцитивная сила уменьшается больше чем на порядок (от 7,5 до 0,5 Э, рисунок 21). Минимальное значение  $H_C$  остается практически неизменным до толщины прослойки  $\sim 6$  нм. Дальнейшего уменьшения коэрцитивной силы можно достичь с помощью изменения толщины магнитного слоя  $d_{ML}$ . При увеличении толщины магнитных слоев  $H_C$  монотонно уменьшается, и при  $d_{ML} \sim 200$  нм коэрцитивная сила достигает  $\sim 0,05$  Э (рисунок 22).

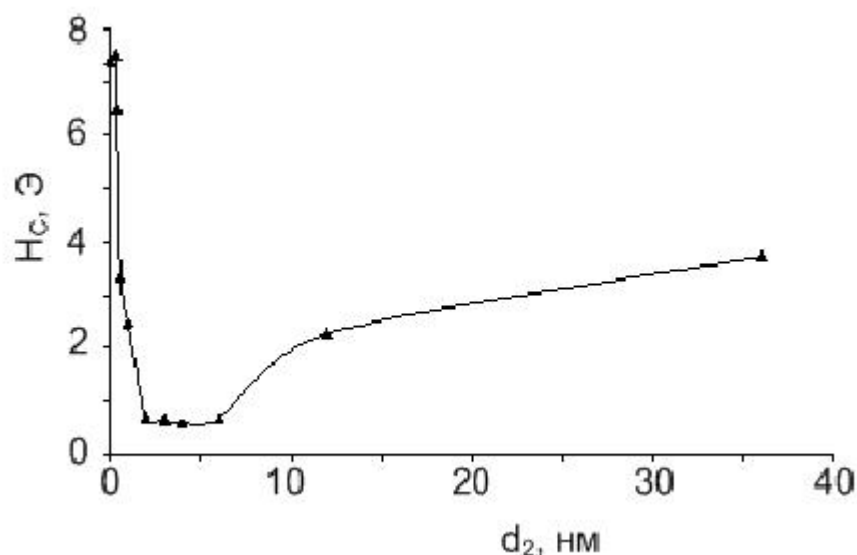


Рис. 21. Зависимость коэрцитивной силы трехслойных пленок с аморфными слоями из Co-P от толщины немагнитной прослойки.

Эффективность влияния толщины слоев на уменьшение  $H_C$  можно установить по величине  $\beta$ , которая равна отношению коэрцитивных сил однослойной и трехслойной пленок с одной и той же толщиной магнитных слоев.  $\beta$  растет с увеличением толщины магнитных слоев от 10 при  $d_{ML}=35$  нм до  $\sim 60$  при  $d_{ML}=200$  нм.

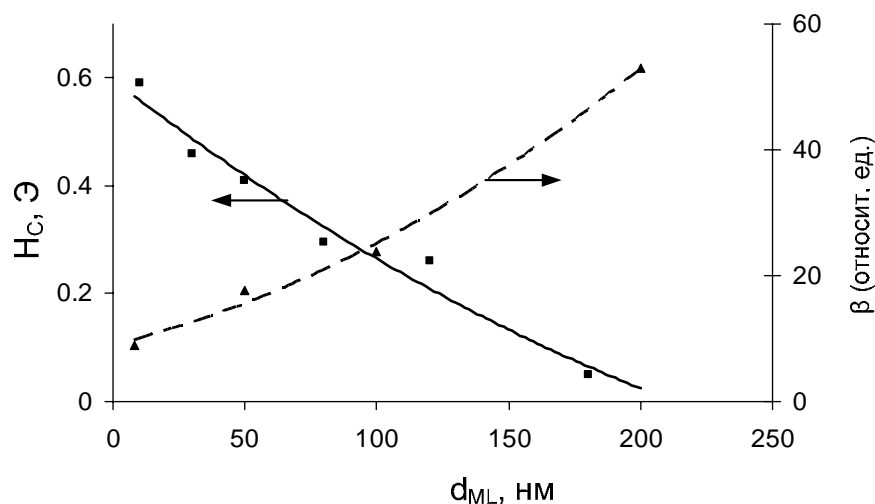


Рис. 22. Зависимость коэрцитивной силы симметричной трехслойной пленки от толщины магнитных слоев и ее относительное изменение.

Наблюдаемые изменения коэрцитивной силы указывают на то, что стенки Нееля в трехслойных пленках могут существовать при значительно больших толщинах магнитных слоев, чем в однослойных пленках. Этот вывод согласуется с теоретическими представлениями, согласно которым наибольшее уменьшение коэрцитивной силы в многослойных пленках будет наблюдаться для 180-градусных стенок Нееля, и подтверждается исследованиями доменных границ в подобных структурах.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, которые получены в результате исследований процессов квазистатического перемагничивания в ферромагнитных кристаллах и пленках при наличии в них релаксационных явлений, сводятся к следующим:

1. Разработан метод создания качественных поликристаллических пленок магнитного полупроводника  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , обладающих малыми потерями при перемагничивании.
2. Впервые исследована магнитоупругая анизотропия пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  при наличии анион-катионной нестехиометрии. Показано, что вакансии Se вносят отрицательный вклад в величину  $\lambda_s$ , а вакансии Cd – положительный. Магнитоупругая анизотропия пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  связывается с наличием ионов с сильным спин-орбитальным взаимодействием ( $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Cr}^{2+}$ ).
3. Установлено, что магнитная вязкость, наблюдаемая в пленках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , связана со стабилизацией ДГ. На основе одноионного приближения выполнен расчет поля стабилизации в  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  с учетом ионов  $\text{Cr}^{4+}$ .
4. Установлена аномальная температурная зависимость начальной магнитной восприимчивости  $\text{FeVO}_3$ , которая проявляется при температурах меньших 180 К.



5. Установлены процессы релаксации в  $\text{FeVO}_3$ , которые проявляются в температурной зависимости мнимой части магнитной восприимчивости и дезаккомодации соответственно в области высоких и низких температур. Определена величина энергии активации, которая составляет  $\sim 0,30$  эВ, и постоянная времени релаксации намагниченности  $\tau_0 \sim 10^{-8}$  с.

6. Определены механизмы формирования полосовых структур в  $\text{FeVO}_3$ . Показано, что полосовые структуры можно рассматривать как неоднородные магнитные структуры (НМС), образование которых связывается с частичным выходом ферромагнитного момента из базовой плоскости.

7. Обнаружены фотоиндуцированные автоколебания НМС в номинально чистых кристаллах  $\text{FeVO}_3$  при  $T < 148$  К. Установлены два состояния, устойчивое и неустойчивое, в которых может находиться ферромагнитный момент при воздействии света. Показано, что наличие таких состояний формируют автоколебательный процесс, который вызывается фотоиндуцированными переходами системы из устойчивого в неустойчивое состояние.

8. Установлено наличие НМС в номинально чистых кристаллах гематита при комнатных температурах.

9. Определены условия формирования качественных химически осажденных поликристаллических нанотолщинных пленок Co-P. Установлено, что при толщинах меньших 10 нм магнитные и релаксационные свойства плёнок определяются случайной ориентацией осей легкого намагничивания слабо связанных кристаллитов; при толщинах больших 10 нм проявляются свойства характерные для тонкого однородного слоя.

10. Определены механизмы, обуславливающие величину коэрцитивной силы в аморфных пленках Co-P в отсутствие и при наличии одноосной наведенной анизотропии. Показано:

а) в изотропных пленках коэрцитивная сила обусловлена стабилизацией доменных границ;

б) в пленках с наведенной анизотропией толщинная зависимость коэрцитивной силы связана с изменением структуры доменных границ. Определены области толщин, в пределах которых могут существовать различные типы ДГ.

11. Методом химического осаждения получена трехслойная структура, состоящая из магнитных слоев поликристаллического и аморфного сплавов Co-P и немагнитной прослойки из аморфного сплава Ni-P. В таких структурах обнаружено:

а) релаксационное уменьшение поля смещения и коэрцитивной силы НК слоя при увеличении циклов перемагничивания, которое связано с наличием температурных флуктуаций намагниченности в поликристаллическом слое Co-P.

б) улучшение характеристик интерфейса между магнитным и немагнитным слоями при введении атомов Ni в аморфный сплав Co-P.

12. Разработана методика получения низкокоэрцитивных трехслойных магнитных пленок, образованных магнитными слоями из аморфных сплавов Co-P (либо Co-Ni-P) и немагнитной прослойкой из аморфного сплава Ni-P.

#### Список цитированной литературы.

1. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С.Тикадзуми; пер. с япон. – М.: Мир, 1987. – 497 с.
2. Хуберт, А. Теория доменных стенок в упорядоченных средах / А.Хуберт. – М.: Мир, 1977. – 306 с.
3. Haisma J. and Stacy W.T. Interference fringes due to magnetic domains in  $\text{FeBO}_3$  // J. Appl. Phys. - 1973. – V. 44.- № 7. – P. 3367-3369.
4. Федоров Ю.М., Лексиков А.А., Аксенов А.Е. Светоиндуцированная динамическая неустойчивость доменной структуры в  $\text{FeBO}_3\text{:Ni}$  // Письма в ЖЭТФ. – 1983. – Т. 37.- № 3. - С. 134-136.
5. Aharoni A. Exchange anisotropy in films, and the problem of inverted hysteresis loops // J. Appl. Phys. - 1994.- V. 76. – № 10. - P. 6977-6979.

#### Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов:

1. Турпанов И.А., Чжан А.В., Ким П.Д., Кононов В.П. Стабилизация доменных границ в пленках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  // ФТТ. – 1982. – Т. 24. - № 6 – С. 1858-1860.
2. Чжан А.В., Ким П.Д., Дрокин Н.А., Турпанов И.А. Особенности в поведении доменной структуры в пленках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  // ФТТ. – 1984. – Т. 26. - № 6. – С. 1177-1179.
3. Дрокин Н.А., Чжан А.В., Кононов В.П. Влияние нестехиометрии и упругих напряжений на спектры магнитного резонанса магнитного полупроводника  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  // ФТТ. – 1985. – Т. 27.- № 4. – С. 1250-1251.
4. Чжан А.В., Дрокин Н.А., Ким П.Д. Влияние электрического поля на намагничивание пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  // ФТТ. – 1986. – Т.28. - N5. – С. 1583-1584.
5. Чжан А.В., Исаева Т.Н. Фотоиндуцированные автоколебания полосовой доменной структуры  $\text{FeBO}_3$  // ФТТ. – 1990. – Т.32. - № 1. – С. 280-282.
6. Чжан А.В., Исаева Т.Н. Неоднородная магнитная структура  $\text{FeBO}_3$  // ФТТ. – 1996. – Т.38. – № 8. – С. 2461-2466.
7. Чжан А.В. Образование неоднородных магнитных структур в слабых ферромагнетиках ромбоэдрической симметрии // ФТТ. – 2008. - № 6. – С.1064-1067.
8. Патрин Г.С., Чжан А.В., Кипарисов С.Я., Середкин В.А., Пальчик М.Г. Магнитное последствие в трехслойных пленках на основе Co-P // ФТТ.- 2010. – Т.52. - № 6. – С. 1120-1122.

9. Чжан А.В., Патрин Г.С., Кипарисов С.Я., Середкин В.А., Пальчик М.Г. Структура и магнитные свойства пленок Со-Р в области нанотолщин // ФММ. – 2010. – Т. 109. – № 6. – С. 1-4.

10. Чжан А.В. Неоднородные магнитные структуры в ромбоэдрических слабых ферромагнетиках // Изв. РАН, сер физич. – 2007. – Т.71. – Н. 8. – С. 1183-1185.

11. Чжан А.В., Кипарисов С.Я., Середкин В.А., Патрин Г.С., Пальчик М.Г. Магнитные свойства трехслойных пленок на основе Со-Р // Изв. РАН, сер. физич. – 2009. – Т.73. – № 8. – С. 1222-1224.

12. Чжан А.В., Патрин Г.С., Кипарисов С.Я., Середкин В.А. Коэрцитивная сила, процессы перемагничивания аморфных пленок Со-Р, полученных химическим осаждением // Изв. РАН, сер. физич. - 2010. – Т.74. - № 5. – С. 662-664.

13. Чжан А.В., Патрин Г.С., Кипарисов С.Я., Середкин В.А., Буркова Л.В.. Эффекты Керра и Фарадея в Со-Р пленках, полученных химическим осаждением // Изв. РАН, сер. физич. – 2011. – Т. 75. – № 5. – С. 770-772.

14. Чжан А.В., Патрин Г.С., Кипарисов С.Я., Середкин В.А., Пальчик М.Г., Буркова Л.В. Магнитные и магнитооптические свойства поликристаллических пленок Со-Р в области нанотолщин // Изв. РАН, сер. физич. – 2012. – Т. 76. – № 2. – С. 208–210.

15. Chzhan A.V., Patrin G.S., Kiparisov S.Ya., Seredkin V.A. The induced anisotropy and its influence on domain structure of amorphous Co-P and Co-Ni-P films // J. Siberian University. Mathematics and Physics. – 2010. – V. 3. – № 1. - P. 100-103.

16. Чжан А.В., Середкин В.А., Кипарисов С.Я., Патрин Г.С. Межслоевое взаимодействие в трехслойных пленках, полученных химическим осаждением // Изв. РАН, сер. физич. – 2013. – Т. 77. – № 10. – С. 1416–1418.

17. Чжан А.В. Дезаккомодация начальной магнитной проницаемости в  $\text{FeVO}_3$  при низких температурах // ФТТ. – 2006. – Т. 48. - № 9. – С 1634-1635.

#### Патенты РФ

18. Пат. 105993 Российская федерация, МПК G 01 K 7/02, В 22 D 2/00. Устройство для измерения температуры расплавов / Чжан А.В., Задворный А.Г.; № 2010100003/28, опубл. 27.06. 2011, Бюл. № 18.

19. Пат. 2418288 Российская федерация, МПК G 01 N 21/00, G 01 R 33/00. Способ определения магнитных свойств материалов / Патрин Г.С, Чжан А.В., Задворный А.Г.; № 2009145718/28; опубл.10.05.2011, Бюл. № 13.

20. Пат. 2457279 Российская федерация, МПК С 23 С 18/18, С 23 С 18/32. Способ получения аморфных магнитных пленок Со-Р / Кипарисов С.Я., Чжан А.В., Патрин Г.С. –№ 201121532/02, опубл. 27.07.2012.

#### Другие публикации

21. Chzhan A.V., Fedorov Yu.M., Isaeva T.N. Feature of the Temperature Dependence of the Initial Magnetic Susceptibility in  $\text{FeBO}_3$  // *Phys. Status Solidi. (a)* – 1989. – V.115. – P. 101-103.
22. Chzhan A.V., Patrin G.S., Kiparisov S.Ya., Seredkin V.A., Burkova L.V., and Velikanov D.A. Magnetic and magneto-optical properties of Co–P films prepared by chemical deposition // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2011. – V. 323. – P. 2493-2496.
23. Chzhan A.V., Patrin G.S., Isaeva I.N. Photoinduced relaxation self-oscillations of strip structures in  $\text{FeBO}_3$  // *Defect and diffusion forum.* – 2009. – V.293. – C. 113-117.
24. Chzhan A.V., Vasiliev V. N., Isaeva T.N., Patrin G.S. Research of feature magnetic permeability and domain structures in  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : Ga crystals near the Morin Transition // *Solid State Phenom.* – 2009. – V. 152-153. – P. 29-32.
25. Chzhan A.V., Patrin G.S., Kiparisov S.Ya., Seredkin V.A., Maltsev V.K., Krayukhin I.N. The induced anisotropy and its Influence absorption of the NMR and domain structure of Co-P amorphous films // *Solid State Phenom.* – 2011. – V. 168-169. – P. 145-148.
26. Chzhan A.V., Patrin G.S., Kiparisov S.Ya., Seredkin V.A. The coercivity and interlayer exchange in three-layer films prepared by chemical deposition // *Solid State Phenom.* – 2012. – V. 190. – P. 463-465.
27. Чжан А.В., Патрин Г.С., Задворный А.Г., Середкин В.А. Применение оптоэлектронных устройств для наблюдения доменных структур в ферромагнитных материалах // *Приборостроение.* – 2012. – № 12. – С. 30-33.